

Михалкина С.А., Семёнова О.Ю., Чуриков Д.С., Денисов Д.А.

## ИНТЕРВАЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ КОЭФФИЦИЕНТА ВЛИЯНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ УПРОЧНЁННЫХ ДЕТАЛЕЙ

В настоящее время для оценки влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости деталей с концентраторами по остаточным напряжениям используются два критерия [1,2]. Первый критерий – остаточные напряжения на поверхности опасного сечения детали. Как показали исследования [2], он приводит к большой погрешности при прогнозировании предела выносливости. Вторым критерием – среднеинтегральные остаточные напряжения  $\bar{\sigma}_{ocm}$  [1] – учитывает влияние на предел выносливости величины и характера распределения остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя опасного сечения детали. Было установлено, что этот критерий приводит к существенно меньшей погрешности при прогнозировании предела выносливости.

Для прогнозирования приращения предела выносливости упрочнённых образцов с надрезом был использован критерий среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ocm}$  [1] в виде:

$$\bar{\sigma}_{ocm} = \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^1 \frac{\sigma_z(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi,$$

где  $\sigma_z(\xi)$  – осевые остаточные напряжения в наименьшем сечении детали с концентратором;  $\xi = \frac{y}{t_{кр}}$  – расстояние от дна впадины концентратора  $y$  до текущего слоя, выраженное в долях  $t_{кр}$ ;  $t_{кр}$  – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей при работе поверхностно упрочнённой детали на пределе выносливости.

Приращение предела выносливости при изгибе в случае симметричного цикла  $\Delta\sigma_{-1}$  упрочнённой детали с использованием критерия  $\bar{\sigma}_{ocm}$  определялось по формуле:

$$\Delta\sigma_{-1} = \bar{\psi}_{\sigma} \cdot |\bar{\sigma}_{ocm}|,$$

где  $\bar{\psi}_\sigma$  – коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости по разрушению. Для сплошной цилиндрической детали критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости находится по формуле:

$$t_{кр} = 0,0216D_1,$$

где  $D_1$  – диаметр наименьшего поперечного сечения.

Для полых цилиндрической детали аналогичная зависимость имеет вид:

$$t_{кр} = 0,0216D_1 \cdot \left[ 1 - 0,04 \cdot \left( \frac{d}{D_1} \right)^2 - 0,54 \cdot \left( \frac{d}{D_1} \right)^3 \right],$$

где  $d$  – внутренний диаметр полых детали.

Были проанализированы приведённые в работах [2,3] результаты испытаний на усталость при изгибе в случае симметричного цикла сплошных диаметром  $D$  и полых диаметром  $D/d$  цилиндрических образцов, упрочнённых различными методами поверхностного пластического деформирования: пневмодробеструйной обработкой (ПДО); гидродробеструйной обработкой (ГДО); обкаткой роликом (ОР) с усилиями  $P = 0,5$  кН (ОР1) и  $P = 1,0$  кН (ОР2); алмазным выглаживанием (АВ).

В таблице 1 приведены результаты испытаний на усталость при изгибе сплошных цилиндрических образцов, в таблице 2 – результаты испытаний на усталость при изгибе полых цилиндрических образцов. Во всех случаях после упрочняющей обработки на цилиндрические образцы наносился круговой надрез полукруглого профиля радиуса  $R$  (рис. 1). В таблицах содержатся результаты измерения критической глубины нераспространяющейся трещины усталости  $t_{кр}$ , вычисления критерия  $\bar{\sigma}_{ост}$  и коэффициента  $\bar{\psi}_\sigma$ .

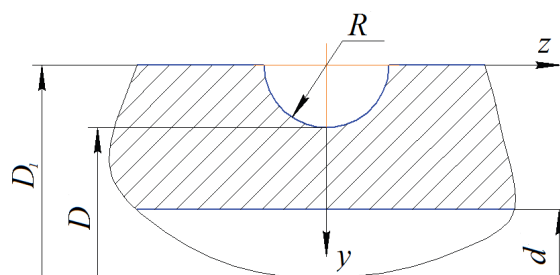


Рис. 1. Цилиндрический образец с надрезом полукруглого профиля и нераспространяющаяся трещина усталости

Влияние остаточных напряжений, вызванных упрочняющей обработкой, на приращение предела выносливости образцов с надрезом изучалось по значениям

коэффициента  $\bar{\psi}_\sigma$ . Проанализированы результаты испытаний более ста партий образцов, средняя величина коэффициента  $\bar{\psi}_\sigma$  для которых составила 0,358.

Для образцов различных диаметров были получены интервальные оценки коэффициента  $\bar{\psi}_\sigma$  и построены доверительные интервалы для его математического ожидания [4] при доверительных вероятностях  $p = 0,9$ ,  $p = 0,95$ ,  $p = 0,99$ . Доверительные интервалы представлены в табл. 3, 4.

Таблица 1 – Результаты испытаний на усталость при изгибе сплошных цилиндрических образцов

$D$ , мм	$R$ , мм	$D_l$ , мм	Материал, упрочняющая обработка	$t_{кр}$ , мм	$\bar{\sigma}_{ост}$ , МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
7,5	0,3	6,9	сплав ЭИ961 (АВ)	0,160	-422	0,356
10	0,3	9,4	стали 20 (ПДО, ОР1, ОР2), 45 (ГДО, ОР1, ОР), 12Х18Н10Т (ГДО, ОР), 30ХГСА (ГДО, ОР), сплавы ЭИ437Б (ГДО), В93 (ГДО), Д16Т (ГДО), ЭИ961 (ГДО)	0,195-0,209	-576-(-59)	0,320-0,386
10	0,5	9,0	сталь 20 (ПДО, ОР1, ОР2)	0,192-0,202	-373-(-48)	0,365-0,390
25	0,3	24,4	стали 20 (ПДО, ОР1, ОР2), 45 (ГДО), 40Х (ГДО), сплав Д16Т (ГДО)	0,508-0,540	-202-(-87)	0,334-0,386
25	0,5	24,0	сталь 20 (ПДО, ОР1, ОР2)	0,520-0,530	-169-(-52)	0,337-0,355
25	1,0	23,0	стали 20 (ПДО, ОР1, ОР2), 40Х (ОР)	0,490-0,510	-292-(-21)	0,334-0,380
40	0,3	39,4	сплав Д16Т (ГДО)	0,860	-85	0,352
50	0,3	49,4	стали 45 (ГДО), 20 (ОР1, ОР2)	1,064	-123-(-67)	0,372
50	0,5	49	сталь 20 (ОР1, ОР2)	1,010-1,086	-112-(-82)	0,357-0,366
50	1,0	48	сталь 20 (ОР1, ОР2)	1,035-1,073	-62-(-46)	0,363-0,380
15	0,3	14,4	сплавы В95 (ПДО), Д16Т (ГДО), стали 45 (ОР1, ГДО), 30ХГСА (ГДО, ОР), 12Х18Н10Т (ГДО, ОР)	0,300-0,314	-507-(-129)	0,318-0,387
15	0,5	14,0	сталь 30ХГСА (ОР)	0,300	-422	0,350

Таблица 2 – Результаты испытаний на усталость при изгибе полых цилиндрических образцов

$D$ , мм	$d$ , мм	$R$ , мм	$D_l$ , мм	Материал, упрочняющая обработка	$t_{кр}$ , мм	$\bar{\sigma}_{ост}$ , МПа	$\bar{\psi}_{\sigma}$
15	5	0,3	14,4	стали 45 (ГДО, ОР), 30ХГСА (ГДО, ОР), 12Х18Н10Т (ГДО), сплавы В95 (ПДО), Д16Т (ПДО, ГДО)	0,294- 0,310	-510- (-126)	0,335- 0,383
15	5	0,5	14,0	сталь 30ХГСА (ОР), сплавы В95 (ПДО), Д16Т (ПДО)	0,302- 0,320	-404- (-72,2)	0,341- 0,381
15	8	0,3	14,4	сталь 45 (ОР)	0,276	-357	0,336
15	10	0,3	14,4	стали 45 (ГДО, ОР), 30ХГСА (ГДО, ОР), 12Х18Н10Т (ГДО), сплав Д16Т (ГДО)	0,243- 0,257	-592- (-16)	0,330- 0,388
15	10	0,5	14,0	сталь 30ХГСА (ОР)	0,262	-321	0,358
15	12,4	0,3	14,4	сталь 45 (ГДО)	0,184	-136	0,348
25	10	0,3	24,4	сталь 40Х (ГДО)	0,520	-114	0,373
25	10	1,0	23,0	сталь 40Х (ОР)	0,510	-293	0,410
25	15	0,3	24,4	стали 45 (ГДО), 20 (ПДО, ОР1, ОР2)	0,442- 0,477	-248- (-88,4)	0,331- 0,368
25	15	0,5	24,0	сталь 20 (ПДО, ОР1, ОР2)	0,438- 0,446	-218- (-47)	0,332- 0,372
25	15	1,0	23,0	сталь 20 (ПДО, ОР1, ОР2)	0,410- 0,420	-53- (-14)	0,357- 0,384
25	19	0,3	24,4	сталь 40Х (ГДО)	0,360	-111	0,360
25	19	1,0	23,0	сталь 40Х (ОР)	0,340	-19	0,364
50	40	0,3	49,4	сталь 45 (ГДО)	0,763	-80	0,375
50	40	0,5	49,0	сталь 20 (ОР1, ОР2)	0,710- 0,720	-133- (-82)	0,335- 0,338

Таблица 3 – Доверительные интервалы для коэффициента  $\bar{\psi}_\sigma$  для сплошных цилиндрических образцов

D, мм	R, мм	Доверительные интервалы		
		$p = 0,9$	$p = 0,95$	$p = 0,99$
10	0,3	(0,3470;0,3585)	(0,3458;0,3597)	(0,3434;0,3621)
	0,5	(0,3569;0,3991)	(0,3469;0,4091)	(0,3062;0,4498)
15	0,3	(0,3491;0,3754)	(0,34614;0,3784)	(0,3393;0,3852)
25	0,3	(0,3375;0,3735)	(0,3325;0,3785)	(0,3195;0,3915)
	0,5	(0,3263;0,3604)	(0,3182;0,3685)	(0,2854;0,4013)
	1,0	(0,3517;0,3843)	(0,3459;0,3901)	(0,3275;0,4085)
50	0,3	(0,3047;0,3860)	(0,2854;0,4053)	(0,2071;0,4836)
	0,5	(0,3331;0,3899)	(0,3044;0,4186)	(0,0752;0,6478)

Таблица 4 – Доверительные интервалы для коэффициента  $\bar{\psi}_\sigma$  для полых цилиндрических образцов

D, мм	d, мм	R, мм	Доверительные интервалы		
			$p = 0,9$	$p = 0,95$	$p = 0,99$
15	5	0,3	(0,3547;0,3773)	(0,3519;0,3801)	(0,3455;0,3865)
		0,5	(0,3199;0,3927)	(0,3028;0,4099)	(0,2328;0,4867)
15	10	0,3	(0,3430;0,3763)	(0,3385;0,3809)	(0,3264;0,3929)
25	15	0,3	(0,3259;0,3706)	(0,3180;0,3785)	(0,2928;0,4037)
		0,5	(0,3073;0,3841)	(0,2890;0,4023)	(0,2150;0,4764)
		1,0	(0,3491;0,3963)	(0,3379;0,4075)	(0,2928;0,4530)

Из приведённых в табл. 3, 4 данных видно, что при различной доверительной вероятности для сплошных образцов доверительные интервалы для коэффициента  $\bar{\psi}_\sigma$  меньше, чем для полых образцов. Это обстоятельство необходимо учитывать при прогнозировании предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей с концентраторами напряжений.

#### Библиографический список

1. Павлов, В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений [Текст] / В.Ф. Павлов // Известия вузов: Машиностроение. – 1986. – №8. – С. 29-32.
2. Павлов, В.Ф. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений [Текст] / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.Б. Иванов. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2008. – 64 с.
3. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям [Текст] / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулук. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. – 125 с.
4. Денискина, Е.А. Статистический анализ данных [Текст] / Е.А. Денискина, П.Э. Коломиец. – Самара: СГАУ, 2005. – 64 с.